

УДК 65.011.56:658.524

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

**В. Я. Копп**

Доктор технических наук, профессор  
Заслуженный деятель науки и техники Украины,  
Заведующий кафедрой\*

**О. П. Чуб**

Кандидат технических наук, доцент\*

**Контактный тел.: 0509698962****E-mail:** ps@sevgtu14.sebastopol.ua, oksanachub@yandex.ru

\* Кафедра автоматизированных приборных систем,  
Севастопольский национальный технический университет,  
ул. Университетская, г. Севастополь, Украина, 99053

*Розглядається оцінка ефективності використання методики оптимізації автоматизованих виробничих систем, які переналагоджуються при обмеженні рівня їх продуктивності. Виявлено, що найбільша ефективність методики оптимізації відповідає меншим значенням заданої продуктивності і становить більше 30 %.*

*Ключові слова:* автоматизована виробнича система, оптимізація.

*Рассматривается оценка эффективности использования методики оптимизации переналаживаемых автоматизированных производственных систем при ограничении уровня их производительности. Выявлено, что наибольшая эффективность методики оптимизации соответствует меньшим значениям заданной производительности и составляет более 30 %.*

*Ключевые слова:* автоматизированная производственная система, оптимизация.

*Estimation of efficiency of the use of optimization techniques of automated readjusted production systems by limiting the level of their productivity is presented. It was revealed that the greatest efficiency of the optimization techniques corresponds to a lower values of the specified capacity and is more than 30 %.*

*Keywords:* automated production system, optimization.

## 1. Введение

Проведенные исследования относятся к области автоматизации производственных систем в условиях серийного и мелкосерийного производства. Переналаживаемым автоматизированным производственным системам (ПАПС) присущи все признаки, характерные для сложных систем: наличие единой цели функционирования, сложность реализуемых системой функций и поведения системы, взаимодействие системы с внешней средой и функционирование в условиях воздействия случайных факторов, нерегулярность во времени воздействия входной нагрузки и др. Все многообразие действующих факторов и реакцию системы на них интегрально оценивают следующими основными показателями: производительностью, коэффициентом готовности, гибкостью и экономической эффективностью. Основным резервом повышения производительности в условиях мелкосерийного производства является сокращение простоев системы. Отказы оборудования, а также необходимость проведения частых переналадок являются главными причинами простоев системы.

## 2. Постановка задачи оптимизации ПАПС. Критерии оптимизации

Одной из важных задач, возникающих при совершенствовании автоматизированных переналаживаемых

систем, является нахождение наилучшего по определенному критерию варианта обслуживания данных систем. Так возможно имеющиеся резервы направлять на устранение простоев по отказам (на ремонт оборудования), либо на осуществление переналадок, чем уменьшить соответствующие длительности простоев. Но это в свою очередь повлечет за собой вложение средств на оплату работ по устранению отказов, либо осуществлению переналадок.

Известно, что критерием выбора оптимального решения при параметрическом синтезе ПАПС с учетом ее надежности и переналадок служит минимум приведенных затрат [2], определяемый формулами. Тогда задача сводится к определению минимума:

$$C + Y \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $C$  — текущие затраты на повышение надежности и гибкости системы;  $Y$  — суммарный ущерб от отказов и переналадок.

Следует отметить, что ущерб  $Y$  от отказов и переналадок тем меньше, чем выше коэффициент готовности системы и меньше время переналадок, что очевидно. Однако, как правило, на практике решаются и другие задачи, вытекающие из приведенного выше выражения: одна составляющая в (1) принимается за критерий оптимизации, а другая используется в качестве ограничения, т. е. решаются задачи условной оптимизации. Они формулируются следующим образом:

■ обеспечение максимальной производительности ПАПС на основе оптимального распределения ограниченных ресурсов;

■ минимизация суммарных вкладываемых средств, обеспечивающих заданный уровень производительности функционирования ПАПС.

На основе математической модели [1] рассмотрим подробнее производительность ПАПС с учетом влияния переналадок и отказов для дальнейшего решения задач оптимизации.

Производительность — это количество годной продукции в единицу времени, равная:

$$\Pi = \frac{1}{T_p + T_o(C_o) + T_n(C_n)}, \quad (2)$$

где  $T_p$  — математическое ожидание времени обслуживания единицы продукции;  $T_o(C_o)$ ,  $T_n(C_n)$  — математические ожидания времен простоев системы соответственно из-за отказов и переналадок системы (приходящиеся на одну деталь), зависящие от количества вложенных средств  $C_o$ ,  $C_n$  на мероприятия по их снижению.

Время работы  $T_p$  переналаживаемой системы по модели [1, 3], определяется следующим образом:

$$T_p = \frac{\prod_{i=1}^m \left( \frac{M\alpha_{ii}}{P_i} \right)}{\sum_{p=1}^m \prod_{i=1, i \neq p}^m \left( \frac{M\alpha_{ii}^p}{P_i^p} \right)}, \quad (3)$$

где  $M\alpha_{ii}$  — математические ожидания времени обслуживания  $i$ -й партии продукции,  $P_i = n_i / \sum_{i=1}^m n_i$  — вероятности поступления продукции  $i$ -го вида ( $n_i$  — размер партии  $i$ -го вида,  $i = \overline{1, m}$ ).

Время  $T_o(C_o)$  определяется как разность математического ожидания времени обслуживания единицы продукции с учетом простоев по отказам  $T_{po}$  и  $T_p$ :

$$T_o(C_o) = T_{po} - T_p.$$

$T_{po}$  в общем случае определяется [3]:

$$T_{po} = \frac{\prod_{i=1}^m \left( \frac{M\alpha_{ii}(M\alpha_{2i} + M\beta_{2i})}{P_i \cdot M\alpha_{2i}} \right)}{\sum_{p=1}^m \prod_{i=1, i \neq p}^m \left( \frac{M\alpha_{ii}^p(M\alpha_{2i}^p + M\beta_{2i}^p)}{P_i^p \cdot M\alpha_{2i}^p} \right)}, \quad (4)$$

где  $M\alpha_{2i}$  и  $M\beta_{2i}$  — математические ожидания времен наработки на отказ и восстановления ПАПС при обслуживании различных видов продукции,  $i = \overline{1, m}$ .

Если времена наработки на отказ и восстановления не зависят от вида продукции, то (4) преобразуется к виду

$$T_{po} = \frac{(M\alpha_2 + M\beta_2)}{M\alpha_2} \cdot \frac{\prod_{i=1}^m \left( \frac{M\alpha_{ii}}{P_i} \right)}{\sum_{p=1}^m \prod_{i=1, i \neq p}^m \left( \frac{M\alpha_{ii}^p}{P_i^p} \right)}, \quad (5)$$

где  $M\alpha_2$  и  $M\beta_2$  — математические ожидания времен наработки на отказ и восстановления ПАПС.

Тогда получаем

$$T_o(C_o) = \left[ \frac{(M\alpha_2 + M\beta_2)}{M\alpha_2} - 1 \right] \cdot \frac{\prod_{i=1}^m \left( \frac{M\alpha_{ii}}{P_i} \right)}{\sum_{p=1}^m \prod_{i=1, i \neq p}^m \left( \frac{M\alpha_{ii}^p}{P_i^p} \right)}. \quad (6)$$

Время  $T_n(C_n)$  при известных  $M\alpha_{ij}$  — математических ожиданиях времен переналадок с  $i$ -й на  $j$ -ю партию, вероятностях  $P_{ij} = 1/(m-1)$ ,  $P_{\Sigma i} = 1/m$  ( $m$  — количество видов продукции) равно математическому ожиданию случайной величины времени переналадок:

$$T_n(C_n) = \frac{\prod_{i=1}^m \left( \frac{1}{P_{\Sigma i}} \cdot \frac{\prod_{j=1, j \neq i}^m \left( \frac{M\alpha_{ij}}{P_{ij}} \right)}{\sum_{p=1}^m \prod_{j=1, j \neq i, j \neq p}^m \left( \frac{M\alpha_{ij}^p}{P_{ij}^p} \right)} \right)}{\sum_{f=1}^m \prod_{i=1, i \neq f}^m \left( \frac{1}{P_{\Sigma i}^f} \cdot \frac{\prod_{j=1, j \neq i}^m \left( \frac{M\alpha_{ij}^{pf}}{P_{ij}^{pf}} \right)}{\sum_{p=1}^m \prod_{j=1, j \neq i, j \neq p}^m \left( \frac{M\alpha_{ij}^{pf}}{P_{ij}^{pf}} \right)} \right)}. \quad (7)$$

Обозначим выражение

$$\frac{\prod_{j=1, j \neq i}^m \left( \frac{M\alpha_{ij}}{P_{ij}^{pf}} \right)}{\sum_{p=1}^m \prod_{j=1, j \neq i, j \neq p}^m \left( \frac{M\alpha_{ij}^{pf}}{P_{ij}^{pf}} \right)} = M\alpha_i^f,$$

где  $M\alpha_i^f$  — математическое ожидание времени переналадки с изделия  $i$ -го типа на другие из  $m$ . Тогда (7) преобразуется к виду

$$T_n(C_n) = \frac{\prod_{i=1}^m \left( \frac{1}{P_{\Sigma i}^f} \cdot M\alpha_i^f \right)}{\sum_{f=1}^m \prod_{i=1, i \neq f}^m \left( \frac{1}{P_{\Sigma i}^f} \cdot M\alpha_i^f \right)}. \quad (8)$$

### 3. Определение эффективности методики оптимизации ПАПС

Методика, эффективность применения которой определяется, позволяет обеспечить заданный уровень производительности системы и определить, какое минимальное суммарное количество средств, при этом, возможно использовать, то есть задействовать резервы системы. Это особенно актуально в условиях проведения частых переналадок в условиях мелкосерийного производства.

Было проведено решение следующей оптимизационной задачи. При изготовлении  $m$  видов продукции имеются некоторые резервы повышения производительности за счет сокращения простоев системы из-за отказов и переналадок. Возможно вложение средств на сокращение данных потерь. Причем, необходимо обеспечить заданный уровень производительности системы

и определить, какое минимальное суммарное количество средств, при этом, возможно использовать. Целевая функция [1, 2] — сумма вкладываемых средств имеет вид

$$C = \sum_{i=1}^m C_{ni} + C_0 \rightarrow \min, \quad (9)$$

где  $C_{ni}$  — средства на сокращение  $i$ -х ( $i = \overline{1, m}$ ) переналадок,  $C_0$  — средства на сокращения простоев из-за отказов.

Известно, что при вложении средств с увеличением затрат скорость увеличения отдачи уменьшается, а начиная с некоторой величины, остается на прежнем уровне. Исходя из этого, для аппроксимации реальной зависимости простоев из-за переналадок  $i$ -го вида продукции от вкладываемых средств, возможно использовать экспоненциальную функцию следующего вида (рис. 1):

$$T_{ni}(C_{ni}) = a_{ni} + k_{ni} \cdot e^{-\lambda_{ni} C_{ni}}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Здесь  $\lambda_{ni}$ ,  $k_{ni}$ ,  $a_{ni}$  — постоянные коэффициенты, определяемые при аппроксимации методом наименьших квадратов, а  $C_{ni}$  — средства, вкладываемые на сокращение простоев при переналадке.

Аналогично для зависимости времени восстановления системы от вкладываемых средств получаем (рис. 1):

$$T_o(C_o) = a_o + k_o \cdot e^{-\lambda_o C_o},$$

где  $\lambda_o$ ,  $k_o$ ,  $a_o$  — постоянные коэффициенты, определяемые при аппроксимации, а  $C_o$  — средства, вкладываемые на сокращение времени восстановления.

Ограничением при решении оптимизационной задачи выступает заданное значение производительности ПАПС [1, 2].

$$\Pi = 1 / \left( \frac{(M\alpha_2 + a_o + k_o \cdot e^{-\lambda_o C_o}) \cdot \prod_{j=1, j \neq i}^m \left( \frac{M\alpha_{ji}}{P_i} \right)}{M\alpha_2} + \frac{\prod_{i=1}^m \left( \frac{a_{ni}^f + k_{ni}^f \cdot e^{-\lambda_{ni}^f C_{ni}^f}}{P_{\Sigma}^f} \right)}{\sum_{f=1}^m \prod_{i=1, i \neq f}^m \left( \frac{a_{ni}^f + k_{ni}^f \cdot e^{-\lambda_{ni}^f C_{ni}^f}}{P_{\Sigma}^f} \right)} \right), \quad (10)$$

где  $M\alpha_2$  — математическое ожидание времен наработки на отказ ПАПС;  $M\alpha_{ji}$  — математические ожидания времени

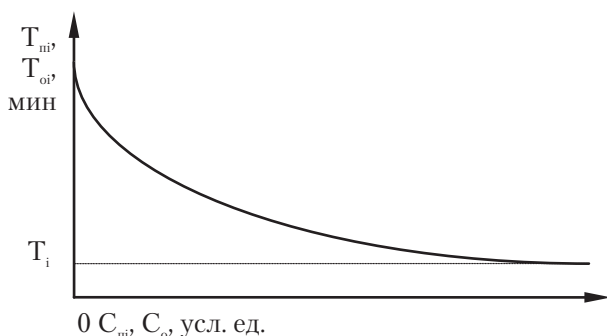


Рис. 1. Зависимость простоев системы из-за отказов  $T_o$  и переналадок  $T_{ni}$  от количества вкладываемых средств  $C_{ni}$ ,  $C_o$

обслуживания  $i$ -й партии продукции;  $P_i = n_i / \sum_{i=1}^m n_i$  ( $n_i$  — размер партии  $i$ -го вида,  $i = \overline{1, m}$ ) — вероятности поступления продукции  $i$ -го вида;  $P_{ij} = 1/(m-1)$ ,  $P_{\Sigma i} = 1/m$  — вероятности [3].

Переход от условной оптимизации к безусловной, осуществлялся путем выделения  $C_0$  из (10) и подстановки полученного выражения в (9). Полученный таким образом критерий оптимизации имеет вид:

$$C = \sum_{i=1}^m C_{ni} - \frac{1}{\lambda_o} \ln \left( \frac{1}{a_o} \left( \frac{M\alpha_2 \sum_{i=1}^m \prod_{j=1, j \neq i}^m \left( \frac{M\alpha_{ji}}{P_i} \right)}{\prod_{j=1, j \neq i}^m \left( \frac{M\alpha_{ji}}{P_i} \right)} \right) \left( 1/P - \frac{\prod_{i=1}^m \left( \frac{a_{ni} + k_{ni} \cdot e^{-\lambda_{ni} C_{ni}}}{P_{\Sigma i}} \right)}{\sum_{f=1}^m \prod_{i=1, i \neq f}^m \left( \frac{a_{ni}^f + k_{ni}^f \cdot e^{-\lambda_{ni}^f C_{ni}^f}}{P_{\Sigma}^f} \right)} \right) - (M\alpha_2 + k_o) \right) \rightarrow \min. \quad (11)$$

Решение задачи проводилось градиентным методом.

В табл. 1 приводятся исходные данные, которые использовались при решении поставленной задачи оптимизации при  $m=6$  для некоторых значений требуемой производительности производственной системы (3,300; 3,400; 3,500; 3,600; 3,700; 3,786 дет./ч). Начальное значение суммы вкладываемых средств составляет 90,348 усл. ед. для всех уровней требуемой производительности.

В табл. 2 приведены результаты расчетов следующих параметров: размера суммарных затрат и значения составляющих затрат, направляемых на сокращение потерь

Таблица 1

Исходные данные для задачи оптимизации

Зависимости времен восстановления и переналадок от вкладываемых средств	Заданная производительность, дет./ч	Начальные вкладываемые средства по соответствующим направлениям, усл. ед.	$M\alpha_{ji}$ , ч	$P_i$
$T_o(C_o) = 25 + 173,447 \cdot e^{-7,163 C_o}$	—	0,838	—	—
$T_{n1}(C_{n1}) = 20 + 154,599 \cdot e^{-2,347 C_{n1}}$	3,786	4,1	30,20	$P_1 = 0,132$
$T_{n2}(C_{n2}) = 20 + 174,647 \cdot e^{-2,431 C_{n2}}$	3,700	4,1	50,10	$P_2 = 0,198$
$T_{n3}(C_{n3}) = 20 + 170,836 \cdot e^{-2,438 C_{n3}}$	3,600	4,0	25,10	$P_3 = 0,165$
$T_{n4}(C_{n4}) = 21 + 244,647 \cdot e^{-2,722 C_{n4}}$	3,500	3,8	38,05	$P_4 = 0,176$
$T_{n5}(C_{n5}) = 23 + 331,151 \cdot e^{-3,043 C_{n5}}$	3,400	3,9	40,04	$P_5 = 0,154$
$T_{n6}(C_{n6}) = 23 + 309,766 \cdot e^{-2,939 C_{n6}}$	3,300	3,9	52,21	$P_6 = 0,176$

Таблица 2

## Результаты решения задачи оптимизации

Заданная производительность, дет./ч.	Минимальное значение суммы средств, С, усл. ед.	Неоптимальное, равномерное по всем направлениям распределение средств, обеспечивающее заданную производительность, усл. ед.	Экономия средств за счет их оптимального распределения, %	Оптимальные размеры вкладываемых средств, обеспечивающих заданную производительность системы, $C_0, C_{п1}, C_{п2}, C_{п3}, C_{п4}, C_{п5}, C_{п6}$ , усл. ед.
3,786	47,970	52,00	8,4	$C_0 = 3,409$ $C_{п1} = 8,946$ ; $C_{п3} = 7,581$ ; $C_{п2} = 7,588$ $C_{п4} = 7,196$ ; $C_{п5} = 6,444$ ; $C_{п6} = 6,811$
3,700	19,382	24,00	23,8	$C_0 = 1,735$ $C_{п1} = 4,480$ ; $C_{п2} = 3,0632$ ; $C_{п3} = 3,062$ $C_{п4} = 2,714$ ; $C_{п5} = 1,988$ ; $C_{п6} = 2,340$
3,600	6,259	8,45	35,0	$C_0 = 1,548$ $C_{п1} = 2,439$ ; $C_{п2} = 0,891$ ; $C_{п3} = 0,907$ $C_{п4} = 0,475$ ; $C_{п5} = 0$ ; $C_{п6} = 0$
3,500	6,118	8,27	35,2	$C_0 = 1,211$ $C_{п1} = 2,329$ ; $C_{п2} = 0,839$ ; $C_{п3} = 1,244$ $C_{п4} = 0,447$ ; $C_{п5} = 0$ ; $C_{п6} = 0,048$
3,400	4,508	6,24	38,4	$C_0 = 0,891$ $C_{п1} = 1,820$ ; $C_{п2} = 0,703$ ; $C_{п3} = 0,634$ $C_{п4} = 0,420$ ; $C_{п5} = 0$ ; $C_{п6} = 0,049$
3,300	3,800	5,29	39,2	$C_0 = 0,716$ $C_{п1} = 1,305$ ; $C_{п2} = 0,650$ ; $C_{п3} = 0,620$ $C_{п4} = 0,440$ ; $C_{п5} = 0$ ; $C_{п6} = 0,045$

времени из-за переналадок и отказов, значения экономии средств за счет оптимального распределения.

Данные по относительному уменьшению (по сравнению с начальным значением) суммы вкладываемых средств  $\Delta C$ , соответствующие оптимальным значениям этих средств С, обеспечивающих заданные уровни произ-

водительности системы (3,300; 3,400; 3,500; 3,600; 3,700; 3,786 дет./ч), приводятся в табл. 3 и показаны на рис. 2, а по зависимости минимального значения суммы средств С от заданной производительности П — на рис. 3.

Анализ данных табл. 2, 3 и рис. 2, 3 позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, для рассматриваемых условий производства оказалось возможным снижение уровня суммарных вкладываемых средств по сравне-

Таблица 3

Относительное уменьшение суммы вкладываемых средств  $\Delta C$ , соответствующие оптимальным значениям этих средств С, обеспечивающих заданные уровни производительности системы

Заданная производительность, дет./ч	Минимальное значение суммы средств, С, усл. ед.	Относительное уменьшение суммы вкладываемых средств, $\Delta C$ , %
3,786	44,041	51
3,700	19,382	78
3,600	6,259	92
3,500	6,118	93
3,400	4,508	94

С, %

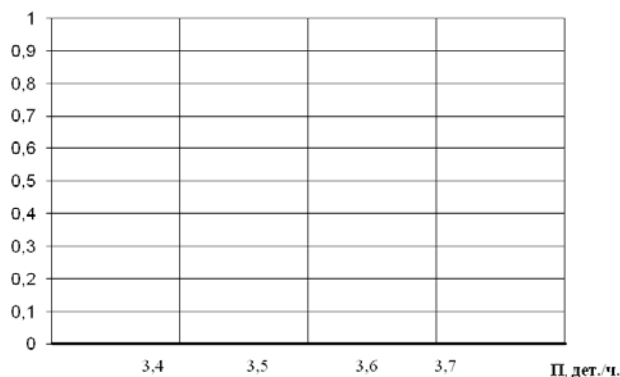


Рис. 2. Зависимость относительного уменьшения суммы выделяемых средств С от П

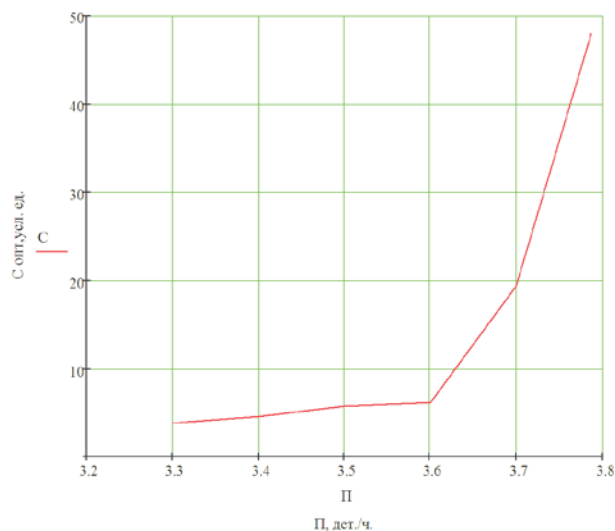
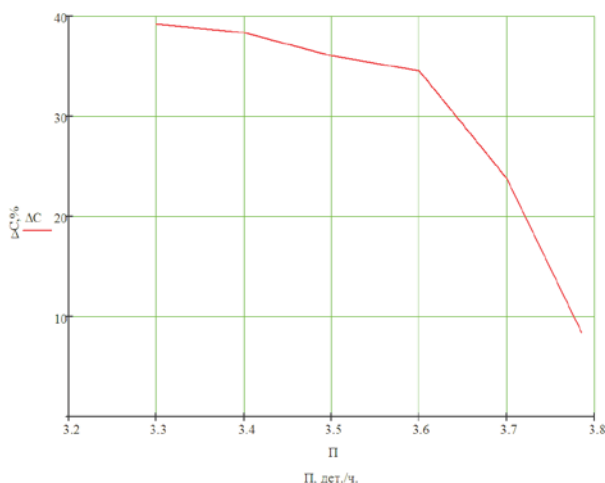


Рис. 3. Зависимость минимального значения суммы средств С от заданной производительности П, дет./ч.

нию с начальным значением за счет их оптимального распределения, причем, для производительности менее 3,6 дет./ч, относительное снижение затрат является наиболее значительным (от 92 % до 95 %). Во-вторых, по сравнению с неоптимальным равномерным распределением, обеспечивающим заданный уровень производительности, методика оптимизации позволяет достичь экономии средств до 39,2 %. Для производительности менее 3,6 дет./ч, относительное снижение затрат является наиболее значительным (от 35 % до 39,2 %, см. рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость экономии средств  $\Delta C$ , % за счет оптимального их распределения при различных уровнях заданной производительности  $P$ , дет./ч.

Перспективы дальнейшего использования предлагаемого подхода состоят, возможности использования и исследовании эффективности применения других критериев оптимизации ПАПС с учетом других или дополнительных направлений вложения средств (например, — на расширение диапазона технических возможностей оборудования). Кроме этого, может использоваться представление функционирования ПАПС как альтернирующего процесса восстановления абсолютно надежной системы (когда времена отказа и восстановления учтены во времени обслуживания), эквивалентно заменяющей реальную, с известными функциями распределения вре-

мен обслуживания продукции и переналадок. Такой подход позволяет исследовать и совершенствовать многокомпонентные иерархически организованные системы в структуре предприятия.

#### 4. Выводы

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, получены оптимальные значения суммарных вкладываемых средств, обеспечивающие заданные уровни производительности. При увеличении требуемой производительности, необходимо увеличивать сумму средств на сокращение простоев системы из-за переналадок и отказов. Во-вторых, для рассматриваемых условий производства оказалось возможным снижение уровня суммарных вкладываемых средств за счет оптимального их распределения. В-третьих, выявлено, что наибольшая эффективность методики оптимизации соответствует меньшим значениям заданной производительности и составляет более 30 %.

#### Литература

1. Копп В. Я. Математическая модель оценки влияния переналадок и отказов на производительность ГПС мелкосерийного производства [Текст] / В. Я. Копп, О. П. Чуб, Ю. Е. Обжерин // Оптимизация производственных процессов. Сб. науч. тр. — Севастоп. гос. техн. ун-т, 1999. — Вып. 1. — С. 39—45.
2. Чуб О. П. Минимизация суммарных вкладываемых средств, обеспечивающих заданный уровень производительности в условиях переналаживаемого автоматизированного производства [Текст] / О. П. Чуб, В. Я. Копп, Ю. Е. Обжерин // Вестник Сев ГТУ: Автоматизация процессов и управление. — Севастополь: Севастоп. гос. техн. ун-т. — Вып. 27. — 2000. — С. 148—155.
3. Копп В. Я. Моделирование переналаживаемых автоматизированных производственных систем [Текст] / В. Я. Копп, Ю. Е. Обжерин, А. И. Песчанский, О. П. Чуб // Монография. — Севастополь, 2007. — Изд-во СевНТУ, 2007, 232 с., ил.

УДК 656.13+612.821

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОСТОЯНИЕ ВОДИТЕЛЯ В ТРАНСПОРТНОМ ЗАТОРЕ

**Н. У. Гюлев**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра транспортных систем и логистики,  
Национальная академия городского хозяйства,  
ул. Революции, 12, г. Харьков, Украина, 61002

**Контактный тел.:** (057) 716-93-70

**E-mail:** ngulev@mail.ru

*Представлені результати досліджень чинників, що впливають на функціональний стан водія в транспортному заторі.*

*Ключові слова: чинник, функціональний стан.*

*Представлены результаты исследования факторов, влияющих на функциональное состояние водителя в транспортном заторе.*

*Ключевые слова: фактор, функциональное состояние.*

*The results of researches of factors influencing on the functional state of driver in transport congestion are presented.*

*Keywords: factor, functional state.*